

On-sun demonstration and heat transfer analysis of a modular pressurized air solar receiver

Doctoral Thesis**Author(s):**

Poživil, Peter

Publication date:

2015

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010610153>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

**ON-SUN DEMONSTRATION AND HEAT
TRANSFER ANALYSIS OF A MODULAR
PRESSURIZED AIR SOLAR RECEIVER**

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by
PETER POŽIVIL
MSc ETH ME
born on 29.03.1985
citizen of Niederdorf (BL)

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Aldo Steinfeld, examiner
Dr. Peter Jansohn, co-examiner

2015

Abstract

A high-temperature high-concentration pressurized air solar receiver is considered for driving a power generation Brayton cycle. The modular design consists of an open-end dome-end cylindrical SiC cavity surrounded by a concentric annular reticulated porous ceramic (RPC) foam lined with insulating material, all contained in a stainless steel pressure vessel with a secondary concentrator attached to its windowless aperture. Concentrated solar energy is absorbed by the cavity and transferred to the pressurized air flowing across the RPC by combined conduction, convection, and radiation.

In this thesis, the demonstration of a full-scale solar receiver prototype is elaborated. On-sun experiments were performed at the solar research facility of the Weizmann Institute of Science, Israel, for up to 47 kW of concentrated solar radiative power input in the absolute pressure range of 2 – 6 bar. The peak outlet air temperatures reached 1206 °C for an average solar concentration ratio of 2500 suns. A notable thermal efficiency – defined as the ratio of the enthalpy change of the air flow divided by the solar radiative power input through the aperture – of 91% was achieved at 700 °C and 4 bar.

Concurrently, a numerical model was developed to elucidate the major heat loss mechanisms and to study the impact on the solar receiver performance caused by changes in process conditions, material properties, and geometry for 50 kW solar radiative power input. The governing mass, momentum and energy conservation equations were numerically solved for steady-state conditions by coupled Monte Carlo and finite volume techniques. Model validation was accomplished with experimental results. For all investigated pressures in the range 4 – 15 bar, an optimum design point was found at an outlet air temperature of 665 °C, yielding a thermal efficiency of 80%. For the maximum allowed cavity temperature of 1600 °C, the outlet air temperature and thermal efficiency are 1345 °C and 51%, respectively. For all operating points, reradiation is the

dominant heat loss. At the ~80% thermal efficiency level, relative improvements of up to 11% are possible via geometry and material optimization.

Subsequently, the data obtained from the numerical simulations was extended to higher pressures to fully capture the receiver's performance potential in gas turbine applications. The thermal performance of a solar power tower using an array of high-temperature pressurized air solar receivers was analyzed for a simple Brayton, a recuperated Brayton, a combined Brayton-Rankine cycle, and a dry steam reheat combined cycle. While the power cycle's heat-to-work efficiency increases with higher turbine inlet temperatures and pressures, the receiver's solar-to-heat efficiency decreases at higher operating temperatures and pressures. Using a solar receiver array with a preheat stage, a peak solar cycle efficiency – defined as the ratio of the cycles net work output divided by the solar radiative power input through the receiver's aperture – of 39% was achieved in a combined cycle operating at a receiver outlet air temperature of 1300 °C and a Brayton cycle pressure ratio of 9 driving a Rankine cycle operating at 100 bar and 550 °C superheated steam.

Zusammenfassung

Zur solaren Stromerzeugung soll ein Brayton-Zyklus mit Hilfe eines Hochtemperatur Solar-Receiver befeuert werden. Der Receiver ist modular aufgebaut und besteht aus einer zylinderförmigen einseitig geöffneten SiC Absorber-Kavität, die von einer netzartigen porösen Keramik (RPC) ummantelt wird. Die RPC wird von kühlender Druckluft durchströmt und wird von Isolationsmaterial und einem stählernen Druckbehälter ummantelt. Die Kavität bildet die direkte Schnittstelle zur Absorption konzentrierter Sonnenstrahlung, die ihr durch einen, am Druckbehälter befestigten, Sekundärkonzentrator gebündelt zugeführt wird. Die absorbierte konzentrierte Sonnenenergie wird über die Kavität und RPC an den Druckluftstrom abgegeben, durch ein Zusammenspiel von Wärmeleitung, Konvektion und Strahlungsaustausch innerhalb der RPC.

Die vorliegende Arbeit demonstriert den experimentellen Einsatz eines ausgereiften Receiver Prototyps bei absoluten Drucken von 2 – 6 bar. Die Experimente wurden am Solarforschungsturm des Weizmann Institute of Science in Israel durchgeführt, wo eine solare Eingangsleistung von bis zu 47 kW zur Verfügung stand. Am Luftauslass wurde eine Spitzentemperatur von 1206 °C gemessen, bei einem durchschnittlichen solaren Strahlungsfluss von 2500 Sonnen. Der thermische Wirkungsgrad ist definiert als die Enthalpiesteigerung des Luftstroms geteilt durch den solaren Strahlungsleistungseintrag durch die Öffnung der Kavität – der gemessene Spitzenwert lag bei beachtlichen 91% während eine Luftauslasstemperatur von 700 °C bei 4 bar Druck vorherrschte.

Parallel wurde ein numerisches Modell entwickelt, das den Prototypen abbildet. Das Modell kam zum Einsatz, um die vorherrschenden Wärmeverlustmechanismen bei 50 kW Eingangsleistung aufzuzeigen und die Receiverleistung in einem erweiterten Spektrum an Betriebsbedingungen, sowie bei veränderter Materialbeschaffenheit und Receiver-Geometrie zu studieren.

Für stationäre Arbeitsbedingungen wurden die Gleichungen zur Masse-, Energie- und Impulserhaltung mittels gekoppelter Monte Carlo und finiter Volumen Techniken numerisch gelöst. Unter Zuhilfenahme der experimentellen Resultate, konnte das Receiver-Modell für gültig erklärt werden. Für alle Druckstufen, die von 4 – 15 bar reichten, konnte anhand der Modellresultate ein optimaler Betriebspunkt mit thermischem Wirkungsgrad von 80% bei einer Luftauslasstemperatur von 665 °C gefunden werden. Für die höchstmöglich erlaubte Kavitätstemperatur von 1600 °C erreichte die Luftauslasstemperatur 1345 °C bei einem Wirkungsgrad von 51%. Für alle Betriebspunkte ist die Wärmerückstrahlung der grösste Verlustfaktor. Die Optimierung von Geometrie- und Materialeigenschaften ermöglicht Wirkungsgradsteigerungen von bis zu 11%, relativ zum ~80%-Wirkungsgradniveau.

Anschliessend wurden die Modelldaten um höhere Druckstufen erweitert, um die Receiver-Leistung für potentielle Anwendungen in Gasturbinenprozessen zu erfassen. Für den Betrieb eines einfachen Brayton-, eines wärmerückgewinnenden Brayton-, und eines kombinierten Brayton-Rankine-Zyklus mit ein oder zwei Überhitzungsstufen, wurde der thermische Wirkungsgrad eines Solarturmkraftwerks mit einer bienenwabeförmigen Anordnung einer Vielzahl von Receivern untersucht. Während der Arbeitswirkungsgrad des Leistungsumwandlungszyklus mit steigenden Temperaturen und Drucken zunimmt, nimmt der thermische Receiver-Wirkungsgrad bei steigenden Temperaturen und Drucken stetig ab. Für den einfachen kombinierten Zyklus konnte unter Verwendung einer zweistufigen Receiver-Matrix, die über eine Vorwärmstufe verfügt, ein Solarzykluswirkungsgrad von 39% erreicht werden – dieser ist definiert als die Nettoarbeitsleistung des Zyklus geteilt durch den solaren Strahlungsleistungseintrag durch die Öffnung der Kavität. Die dazugehörigen Betriebsbedingungen liegen bei einer Receiver-Luftauslasstemperatur von 1300 °C und eines Kompressionsfaktors des Brayton-Zyklus von 9, während der Rankine-Zyklus bei 550 °C und 100 bar betrieben wird.